

## Влияние структуры и изгибов многосердцевинного волоконного световода на перекрестные оптические помехи

О.Н.Егорова, М.С.Астапович, Л.А.Мельников, М.Ю.Салганский, В.П.Мишкин, К.Н.Нищев, С.Л.Семенов, Е.М.Дианов

*Исследовано влияние структуры поперечного сечения и изгибов световода на величину перекрестных оптических помех в многосердцевинном световоде. Введение слоя с пониженным показателем преломления между сердцевинами такого световода с малым расстоянием между центрами соседних сердцевин (27 мкм) снижает величину перекрестных оптических помех на 20 дБ. Достигнутый уровень перекрестных помех, 30 дБ на 1 км длины многосердцевинного световода, приемлем для ряда задач, в которых требуется световод небольшой длины. Кроме того, существенное снижение перекрестных оптических помех наблюдалось при уменьшении диаметра намотки исследованных многосердцевинных световодов с одинаковыми сердцевинами.*

**Ключевые слова:** многосердцевинные световоды, перекрестные оптические помехи, чувствительность к изгибу.

### 1. Введение

Хотя многосердцевинные световоды были предложены еще в 1979 г. [1], именно в настоящее время начинают находиться области их возможных применений. В таких световодах скорость передачи информации по одному световоду может быть увеличена пропорционально количеству сердцевин, что привлекает к ним внимание из-за возможности увеличения с их помощью пропускной способности длинных линий связи [2–4], а также локальных сетей доступа [5, 6]. Достигнутые недавно рекордные скорости передачи информации по одному световоду были получены с применением световода с 12 сердцевинами (1 Пбит/с [7]) и световода с 22 сердцевинами (2.15 Пбит/с [8]). Замена односердцевинных световодов и ленточных кабелей на многосердцевинные световоды позволит упростить конструкцию и обслуживание трактов передачи сигнала в центрах хранения и обработки данных и в суперкомпьютерах [9, 10]. Недавно в ряде работ было предложено использовать многосердцевинные световоды для задач радиофотоники, а именно для создания многоканальной линии задержки [11] и многорезонаторных оптоэлектронных генераторов [12]. В этом случае использование многосердцевинного световода вместо набора отдельных односердцевинных световодов позволяет снизить влияние внешних факторов (например, пространственного расположения световода (макро- и микроизги-

бов) и перепада температуры) на параметры устройств, в том числе на разность групповых задержек между каналами. Многосердцевинные световоды особенно перспективны для задач, в которых необходимы экономия места, снижение количества и веса оптических кабелей. В первую очередь это бортовые линии связи и бортовое оборудование.

Центральным вопросом, связанным с созданием многосердцевинных световодов, является возможность одновременного обеспечения большого числа сердцевин и малых перекрестных оптических помех. Для того чтобы механически световод был достаточно прочным и надежным, его диаметр не должен превышать 200–250 мкм. Очевидно, что для увеличения количества сердцевин в поперечном сечении световода расстояние между ними должно быть снижено, но это приводит к росту перекрестных оптических помех. Для их уменьшения при малом расстоянии между сердцевинами в конструкцию световода вводится расположенный между сердцевинами слой с пониженным относительно оболочки показателем преломления [13]. Благодаря наличию такого слоя, расположенного на некотором расстоянии от сердцевины, напряженность электрического поля моды на краю его распределения уменьшается, при этом также уменьшается перекрытие полей мод соседних сердцевин, что приводит к снижению перекрестных помех. В то же время слой с пониженным показателем преломления не оказывает значительного влияния на свойства моды отдельных сердцевин.

В настоящей работе мы исследовали влияние слоя с пониженным показателем преломления на перекрестные оптические помехи в многосердцевинном световоде. Для этого были изготовлены два многосердцевинных световода со слоем и без него и малым (27 мкм) расстоянием между центрами соседних сердцевин. Установлено, что в данной конструкции световода наличие слоя с пониженным показателем преломления приводит к снижению перекрестных помех на 20 дБ на 1 км длины световода, достигнутый уровень перекрестных помех составил 30 дБ на 1 км. Кроме того, показано, что с уменьшением диаметра намотки световода величина перекрестных оптических помех снижается.

О.Н.Егорова, М.С.Астапович, С.Л.Семенов, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: egorova@fo.gpi.ru

Л.А.Мельников. Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Россия, 410054 Саратов, ул. Политехническая, 77; Саратовский филиал ИРЭ РАН, Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38

М.Ю.Салганский. Институт химии высококачественных веществ РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

В.П.Мишкин, К.Н.Нищев. Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарёва, Россия, Республика Мордовия, 430005 Саранск, ул. Большевикская, 68

Поступила в редакцию 22 октября 2015 г., после доработки – 11 декабря 2015 г.

## 2. Влияние различных факторов на величину перекрестных оптических помех

При распространении излучения по многосердцевинному световоду возникает интерференция полей мод соседних сердцевин, приводящая к переходу излучения из одной сердцевины в другую, т.е. к перекрестным оптическим помехам [14]. На величину этого взаимодействия оказывают влияние структура световода, его пространственное расположение и вариации его параметров по длине.

На рис.1,а показано поперечное сечение световода, содержащее семь световедущих каналов, которые состоят из сердцевин C1–C7, внутренних оболочек C11–C17, а также из слоя L с пониженным показателем преломления. Для оценки влияния слоя с пониженным показателем преломления мы провели расчет коэффициента связи полей мод и длины биений, на которой происходит перетекание мощности из одной сердцевины в другую и обратно, в световодах с наличием или отсутствием слоя с пониженным показателем преломления. Рассматриваемая волноведущая система (рис.1,б) состоит из двух сердцевин C1 и C2 с показателем преломления  $n_C$ , оболочек C11 и C12 с показателем преломления  $n_{C1}$  и области L с уменьшенным показателем преломления  $n_L$ . На длине волны 1550 нм показатели преломления  $n_C = 1.453$ ,  $n_{C1} = 1.444$ ,  $n_L = 1.435$ .

Передача мощности между двумя сердцевинами определяется при помощи уравнения связанных мод [15, 16]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} &= -ic_{21} \exp\left[-i \int_0^z [\beta_2(z') - \beta_1(z')] dz'\right] A_2, \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} &= -ic_{12} \exp\left[-i \int_0^z [\beta_1(z') - \beta_2(z')] dz'\right] A_1. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $A_1$  и  $A_2$  – медленно меняющиеся амплитуды электрических полей мод сердцевин C1 и C2 соответственно;  $c_{12}$  и  $c_{21}$  – коэффициенты связи между модами сердцевин C1 и C2;  $z$  – координата вдоль оси световода;  $\beta_1(z')$  и  $\beta_2(z')$  – постоянные распространения мод соответствующих сердцевин в точке с координатой  $z'$ .

Связанные уравнения для медленно меняющихся амплитуд можно также получить в виде [14, 17]

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} - i \frac{k^2 v_{12}}{2\beta_1 u_{11}} A_2 &= 0, \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} - i \frac{k^2 v_{21}}{2\beta_2 u_{22}} A_1 &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

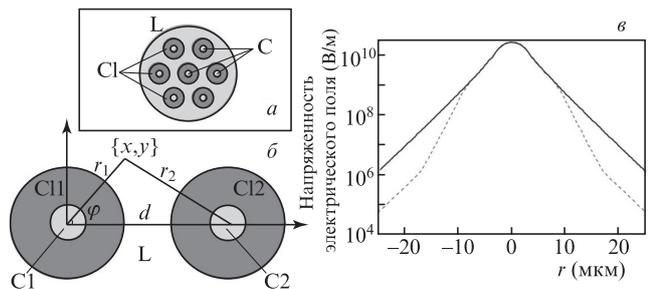


Рис.1. Поперечное сечение многосердцевинного световода (а), рассчитываемая волноведущая система (б) и распределение напряженности электрического поля моды для световодов со слоем с пониженным показателем преломления (штриховая линия) и без этого слоя (сплошная линия) (в).

где

$$\begin{aligned} u_{11} &= \int_{-\infty}^{\infty} dS \Psi_1 \Psi_1; \\ u_{22} &= \int_{-\infty}^{\infty} dS \Psi_2 \Psi_2; \\ v_{12} &= (n_C^2 - n_L^2) \int_{C1} dS \Psi_1 \Psi_2 + (n_{C1}^2 - n_L^2) \int_{C11} dS \Psi_1 \Psi_2; \\ v_{21} &= (n_C^2 - n_L^2) \int_{C2} dS \Psi_1 \Psi_2 + (n_{C1}^2 - n_L^2) \int_{C12} dS \Psi_1 \Psi_2; \end{aligned}$$

$\Psi_1$  и  $\Psi_2$  – поля парциальных мод сердцевин C1 и C2;  $k$  – волновое число. Из этих уравнений следует, что период изменения амплитуды поля в сердцевинах

$$L_p = \frac{4\pi \sqrt{\beta_1 \beta_2 u_{11} u_{22}}}{k^2 \sqrt{v_{12} v_{21}}}.$$

Если сердцевин C1 и C2 одинаковые, то  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ,  $u_{11} = u_{22} = U$ ,  $v_{12} = v_{21} = v$ . При этом, как следует из (1) и (2),  $c_{12} = c_{21} = c = k^2 v / (2\beta U)$ , а  $L_p = 2\pi/c = 4\pi \beta U / (k^2 v)$ . Период изменения мощности или длина биений при этом  $L_b = L_p/2 = \pi/c$ . Как видно, коэффициент связи определяется не только перекрытием полей в сердцевинах, но и перекрытием полей в области оболочки. Наличие области L с меньшим показателем преломления уменьшает поле, создаваемое модой сердцевины C2 в сердцевине C1, т.е. уменьшает перекрестную связь мод [13].

Расчет проводился для сердцевин с одинаковыми параметрами. Использовались следующие значения геометрических параметров: радиусы сердцевин  $R_{C1} = R_{C2} = R_C = 2.65$  мкм, радиусы внутренних оболочек C11 и C12  $R_{C1} = 9.5$  мкм, расстояние между центрами сердцевин  $d = 27$  мкм. При интегрировании по координатам использовались нормированные на  $R_C$  значения  $R_{C1}$  и  $d$ . Интегрирование проводилось численно. Для определения влияния области с меньшим показателем преломления рассмотрено два случая:  $n_L = n_{C1}$  и  $n_L \neq n_{C1}$ .

В случае  $n_L = n_{C1}$  для длины волны 1550 нм характеристическая частота изолированного волновода  $V = 1.7346$ . Решения характеристического уравнения для слабонаправляющего волокна [14, 17] дают  $u = 1.4275$  и  $w = 0.98532$  ( $u^2 + w^2 = V^2$ ). Постоянная распространения  $\beta = \sqrt{k^2 n_C^2 - u^2} / R_C^2 = 5.8653$  мкм<sup>-1</sup>. Выражение для  $\Psi_{1,2}$  возьмем в обычном для слабонаправляющего волновода виде, что дает

$$U = 2\pi \int_0^1 \left[ \frac{J_0(ur)}{J_0(u)} \right]^2 r dr + 2\pi \int_1^\infty \left[ \frac{K_0(wr)}{K_0(w)} \right]^2 r dr = 9.55614,$$

где  $J_0$  и  $K_0$  – функции Бесселя и Макдональда нулевого порядка. Для вычисления  $v$  можно использовать выражение (37.81) из [17], связывающее значения функции Макдональда в смещенных координатах (относительно центров сердцевин, см. рис.1,б):

$$K_0(wr_2) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} (-1)^p K_p(wd) I_p(wr_1) \cos(p\varphi), \quad (3)$$

где  $I_p$  – модифицированная функция Бесселя, а  $r_2^2 = r_1^2 + d^2 - 2dr_1 \cos \varphi$ .

Так как  $n_{Cl} = n_L$ , то выражение для  $v$  включает лишь один интеграл по области Cl. После интегрирования по  $\varphi$  и подстановки выражения для  $K_0(wr_2)$  из (3) получим:

$$v = 2\pi(n_C^2 - n_{Cl}^2) \int_0^1 \frac{J_0(ur_1) K_0(wd) I_0(wr)}{J_0(u) K_0(w)} r_1 dr_1 = 5.02624 \times 10^{-6}.$$

Тогда коэффициент связи  $c = k^2/(2\beta U) = 7.3678 \times 10^{-7} \text{ мкм}^{-1}$ , а длина биений  $L_b = \pi/c \approx 4.3 \text{ м}$ .

В случае  $n_L \neq n_{Cl}$  для расчета длины биений и коэффициента связи нужно найти поле основной моды слабонаправляющего двухслойного волновода. Для этого запишем поля в сердцевине, оболочке и в среде между оболочками [18],

$$E_x(x, y) = \begin{cases} AJ_0(ur), & r \leq 1, \\ BK_0(wr) + CI_0(wr), & 1 < r \leq R_{Cl}, \\ DK_0(qr), & r > R_{Cl}. \end{cases}$$

и составим условия сшивания поля и производных:

$$\begin{aligned} AJ_0(u) &= BK_0(w) + CI_0(w), \\ BK_0(wR_{Cl}) + CI_0(wR_{Cl}) &= DK_0(qR_{Cl}), \\ -UAJ_1(u) &= -wBK_1(w) + wCI_1(w), \\ -wBK_1(wR_{Cl}) + wCI_1(wR_{Cl}) &= -qDK_1(qR_{Cl}), \end{aligned} \tag{4}$$

где  $u^2 = R_C^2(k^2n_C^2 - \beta^2)$ ;  $-w^2 = R_{Cl}^2(k^2n_{Cl}^2 - \beta^2)$ ;  $-q^2 = R_C^2 \times (k^2n_L^2 - \beta^2)$ ;  $-q^2 + w^2 = V_0^2$ .

Условие существования нетривиального решения – равенство нулю определителя системы (4). Это уравнение вместе с уравнениями связи  $u$ ,  $w$  и  $q$  дает возможность определения указанных параметров и постоянной распространения. В нашем случае  $u = 1.42861$ ,  $w = 0.983761$ ,  $q = 1.99411$ ,  $\beta = 5.86526 \text{ мкм}^{-1}$ . Видно, что постоянная распространения  $\beta$  практически не изменилась, так же как и параметры  $u$  и  $w$ . Однако поле в слое с пониженным показателем преломления спадает быстрее, чем в оболочке ( $q \approx 2 > w$ ). Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  определяются из системы (4), и, используя их значения  $A = 1$ ,  $B = 1.282494$ ,  $C = -0.001108$ ,  $D = 44.226722$ , можно найти распределение поля. После интегрирования получаем  $c = 2.132 \times 10^{-8} \text{ мкм}^{-1}$  и  $L_b \approx 150 \text{ м}$ . Значение  $c$  уменьшилось более чем на порядок по сравнению с таковым, полученным в отсутствие слоя с пониженным показателем преломления.

Данные расчеты проверялись численно методом конечных элементов с помощью пакета программ «Comsol Multiphysics». Результаты обоих расчетов совпадают. На рис.1,б показано распределение поля моды в логарифмическом масштабе для сердцевинки при наличии области пониженного показателя преломления и без нее. Видно, что в случае, когда  $n_L < n_{Cl}$ , на краях распределения поля моды напряженность поля существенно меньше, чем в случае, когда слой с пониженным показателем преломления отсутствует. Уменьшение напряженности на краях распределения поля моды позволяет снизить коэффициент связи  $c$  и длину биений  $L_b$ .

Однако следует отметить, что проведенный расчет не учитывает случайных флуктуаций параметров световода по длине и влияния расположения световода на величину

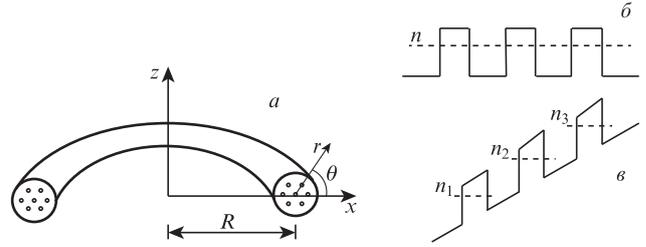


Рис.2. Многосердцевинный световод, изогнутый с радиусом  $R$  (а), и профили показателя преломления вдоль оси  $x$  неизогнутого (б) и изогнутого (в) световодов.

перекрестных помех, поэтому он лишь качественно отражает влияние слоя с пониженным показателем преломления на величину перекрестных помех.

Кроме структуры поперечного сечения световода значительное влияние на величину перекрестных помех оказывает расположение световода в пространстве, т.е. изгиб и поворот световода вокруг оси. На рис.2,а представлен многосердцевинный световод, изогнутый вокруг оси  $z$ , а на рис.2,б – профиль показателя преломления неизогнутого световода вдоль оси  $x$ . Так как все сердцевинки световода одинаковы, то одинаковы их постоянные распространения  $\beta$  и эффективные показатели преломления мод  $n_{eff} = \beta/k$ . Величина  $n_{eff}$  мод на профиле показателя преломления показана штриховой линией. Как известно [19], изогнутый световод эквивалентен прямому световоду с эффективным профилем показателя преломления:

$$n_{eff}^2 = n^2 \left( 1 + 2 \frac{r}{R} \cos \theta \right), \tag{5}$$

где  $r$  и  $\theta$  – координаты точки, в которой определяется показатель преломления, в локальной цилиндрической системе координат;  $n$  – показатель преломления в точке  $(r, \theta)$  в неизогнутом световоде;  $R$  – радиус изгиба. На рис.2,в показан эквивалентный профиль показателя преломления вдоль оси  $x$  ( $\theta = 0$ ) изогнутого световода. Изогнутому световоду соответствует наклонный профиль показателя преломления (наклон, согласно (5), увеличивается с уменьшением радиуса изгиба). Как видно, при изгибе многосердцевинного световода с одинаковыми сердцевинками возникает разница между  $n_{eff}$  соседних мод, с увеличением которой, согласно (1), происходит снижение перекрестных помех. Таким образом, если в неизогнутом многосердцевинном световоде  $n_{eff}$  мод совпадают, то в изогнутом возникает фазовое рассогласование между модами отдельных сердцевин, что приводит к снижению перекрестных оптических помех. При этом в световоде с различными параметрами сердцевин может иметь место обратная ситуация: если в прямом световоде  $n_{eff}$  мод соседних сердцевин различны, то при определенном направлении изгиба разность между ними может снизиться настолько, что выполнится условие фазового синхронизма и резко возрастут перекрестные оптические помехи.

Кроме радиуса изгиба световода  $R$ , наклон профиля показателя преломления, а следовательно и разница между  $n_{eff}$  мод, определяется углом  $\theta$  (рис.2,а, формула (5)). При этом очевидно, что в результате изгиба световода изменение перекрестных помех между центральной сердцевинкой и сердцевинками, центры которых лежат на оси  $x$ , будет больше, чем изменение перекрестных помех между

центральной сердцевинной и другими четырьмя сердцевинами.

Изгибы световода могут приводить как к контролируемому изменению перекрестных помех, например при намотке световода с постоянным диаметром или при сохранении ориентации поперечного сечения световода относительно направления изгиба по всей длине волокна, так и к случайному разбросу перекрестных оптических помех из-за неконтролируемости в реальных условиях эксплуатации изменений  $R$  и  $\theta$  по длине световода [20].

Существуют и другие факторы, приводящие к неконтролируемым изменениям перекрестных оптических помех. Так, в процессе изготовления световода всегда имеют место небольшие вариации диаметра и показателя преломления сердцевин по длине световода [21], в результате чего в световоде с одинаковыми сердцевинами может возникать фазовое рассогласование мод соседних сердцевин, и, как следствие, случайные изменения перекрестных помех. Кроме того, из-за микроизгибов световода может осуществляться перекачка излучения через оболочечные моды соседних сердцевин, т.е. сначала будет проходить вытекание излучения моды одной сердцевины в моды оболочки, которые затем будут взаимодействовать с модами других сердцевин [22].

### 3. Изготовление световодов и измерение характеристик

Заготовки многосердцевинных световодов были собраны из стержней, полученных из односердцевинных заготовок, и стержней из чистого кварцевого стекла. Для создания световода со слоем с пониженным показателем преломления на заготовки с легированной оксидом германия сердцевиной «жакетировалась» трубка из фторированного кварцевого стекла с меньшим, чем у нелегированного  $\text{SiO}_2$ , показателем преломления. Слой из фторированного кварцевого стекла наносился в процессе MCVF. Стержни, полученные перетяжкой из заготовки с легированной  $\text{GeO}_2$  сердцевиной, а также стержни из чистого кварцевого стекла складывались и помещались в трубку из кварцевого стекла. Затем собранная из стержней заготовка превращалась в сплошную путем нагрева в печи при  $2000^\circ\text{C}$  при подаче пониженного давления внутрь трубки. Из сплошных заготовок были вытянуты световоды.

Фотографии центральной части торцов световодов, сделанные с помощью атомно-силового микроскопа, представлены на рис.3. Торцы световодов были предварительно протравлены в плавиковой кислоте. Поскольку

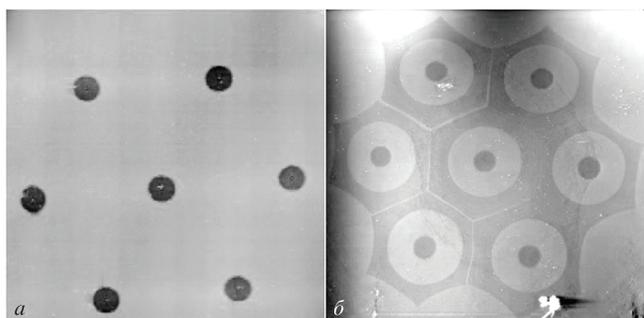


Рис.3. Полученные на атомно-силовом микроскопе изображения торцов световодов без слоя с пониженным показателем преломления (а) и с таким слоем (б).

скорость травления кварцевого стекла зависит от его состава (от концентрации легирующих добавок), то рельеф поверхности торца световода отражает состав стекла, что и позволило получить информацию о геометрии поперечного сечения световода.

Оба световода имели по семь сердцевин, которые были сделаны из одной заготовки и имели одинаковые параметры. Расстояния между центрами соседних сердцевин составляли 27 мкм, диаметр сердцевин был 5.3 мкм, разность показателей преломления сердцевин и оболочки равнялась 0.009. Один из световодов содержал слой с пониженным показателем преломления из фторированного кварцевого стекла толщиной 8–9 мкм (на линии, соединяющей центры соседних сердцевин) и меньшим на 0.009, чем у оболочки, показателем преломления. Диаметр оболочки внутри фторированного слоя составлял 19 мкм.

Длина волны отсечки определялась путем сравнения мощности, прошедшей через прямой отрезок исследуемого световода, с мощностью, прошедшей через отрезок многомодового световода. Для измерений длины волны отсечки первой высшей моды и диаметра поля моды в каждую из исследуемых сердцевин вводилось излучение с помощью пристыкованного односердцевинного световода. Полученные значения длин волн отсечек лежали в диапазоне 1200–1210 нм в световоде без слоя с пониженным показателем преломления и в диапазоне 1300–1400 нм в световоде с таким слоем. Смещение длины волны отсечки связано, очевидно, с дополнительной локализацией поля первой высшей моды слоем с пониженным показателем преломления. Диаметр поля моды в различных сердцевинах при длине волны излучения 1.3 мкм составлял около 6 мкм.

Для измерения перекрестных помех сигнал с длиной волны 1.55 мкм вводился в центральную сердцевину путем стыковки ее с одномодовым односердцевинным подводным световодом. На выходе многосердцевинного световода мощность, излучаемая из различных сердцевин, измерялась путем сканирования торца световода одномодовым световодом, присоединенным к фотоприемнику. Длина световода со слоем с пониженным показателем преломления составляла 1.1 км, а световода без слоя – 1.0 км. Измерения проводились при диаметрах намотки световодов 32, 16 и 5 см. Величина перекрестных помех определялась как отношение выходных мощностей боковой и центральной сердцевин.

Изменения перекрестных помех при намотке световода различного диаметра представлены на рис.4. Видно, что при одном диаметре изгиба световода разброс значений перекрестных оптических помех составляет 10–15 дБ. Разброс может быть обусловлен влиянием условий намотки световода – изменением ориентации его поперечного сечения относительно направления изгиба, микроизгибами и случайными вариациями параметров сердцевин по длине волокна.

Уровень перекрестных оптических помех в световоде со слоем с пониженным показателем преломления был в среднем на 20 дБ меньше, чем в световоде без такого слоя. При диаметре намотки световода 16 см средние значения перекрестных помех в световоде без слоя с пониженным показателем преломления и в световоде со слоем составляют –15 и –35 дБ соответственно.

Величина перекрестных оптических помех снижается с уменьшением диаметра изгиба обоих световодов (рис.4), поскольку, как следует из (5), при этом возрастает наклон

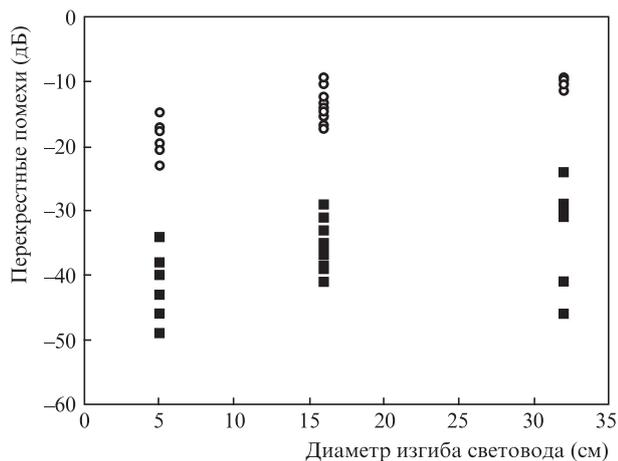


Рис.4. Зависимость перекрестных помех между центральной и боковыми сердцевинами от диаметра изгиба световода со слоем с пониженным показателем преломления (■) и без него (○).

эквивалентного профиля показателя преломления, то приводит к увеличению разности  $n_{\text{eff}}$  мод соседних сердцевин. При уменьшении диаметра изгиба световода с 16 до 5 см перекрестные помехи снижаются в среднем на 5 дБ.

#### 4. Заключение

Изготовлен и исследован многосердцевинный световод с расстоянием между центрами соседних сердцевин 27 мкм со слоем с пониженным показателем преломления и без него. Сравнение свойств световодов показывает, что наличие этого слоя позволяет уменьшить величину перекрестных оптических помех, но не приводит к существенному изменению длины волны отсечки и диаметра поля моды. Значение перекрестных помех между сердцевинами в световоде со слоем с пониженным показателем преломления составляет 30 дБ/км, что приемлемо для ряда задач, в которых длина световода находится в пределах одного или нескольких километров (например, для применений световодов в бортовых устройствах). Изучено влияние диаметра изгиба световода на величину перекрестных помех. При уменьшении диаметра изгиба световода величина перекрестных оптических помех сни-

жается, что обусловлено увеличением разности постоянных распространения мод соседних сердцевин.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-29-08183).

- Inao S., Sato T., Sentsui S., Kuroha T., Nishimura Y. *OFC 1979 Conf. Papers* (Washington, 1979, WB1).
- Sakaguchi J., Awaji Y., Wada N., Hayashi T., Nagashima T., Kobayashi T., Watanabe M. *OFC 2011 Conf. Papers* (Los Angeles, 2011, OWJ2).
- Sakaguchi J., Puttnam B.J., Klaus W., Awaji Y., Wada N., Kanno A., Kawanishi T., Imamura K., Inaba H., Mukasa K., Sugizaki R., Kobayashi T., Watanabe M. *OFC 2012 Conf. Papers* (Los Angeles, 2012, PDP5C.1).
- Zhu B., Taunay T.F., Fishteyn M., Liu X., Chandrasekhar S., Yan M.F., Fini J.M., Monberg E.M., Dimarcello F.V. *Opt. Express*, **19**, 16665 (2011).
- Rosinski B., Chi J.D., Grosso P., Bihan J.L. *J. Lightwave Technol.*, **17**, 807 (1999).
- Zhu B., Taunay T.F., Yan M.F., Fishteyn M., Oulundsen G., Vaidya D. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **22**, 1647 (2010).
- Takara H., Sano A., Kobayashi T., Kubota H., Kawakami H., Matsuura A., Miyamoto Y., Abe Y., Ono H., Shikama K., Goto Y., Tsujikawa K., Sasaki Y., Ishida I., Takenaga K., Matsuo S., Saitoh K., Koshiba M., Morioka T. *Proc. ECOC 2012* (Amsterdam, 2012, Th.3.C.1).
- Puttnam B.J., Luis R.S., Klaus W., Sakaguchi J., Mendinueta J.-M.D., Awaji Y., Wada N., Tamura Y., Hayashi T., Hirano M., Marcianti J. *ECOC 2015* (Valencia, 2015, PDP 3.1).
- Berthold J. *OFC 2012 Conf. Papers* (Los Angeles, 2012, OW1J.1).
- Taubenblatt M. *OFC 2011 Conf. Papers* (Los Angeles, 2011, OThN3).
- Gasulla I., Capmany J. *IEEE Photonics J.*, **4**, 877 (2012).
- Garcia S., Gasulla I. *Opt. Express*, **23**, 2403 (2015).
- Dianov E.M., Egorova O.N., Semjonov S.L. WO 2012/099498 A2.
- Снайдер А., Лав Дж. *Теория оптических волноводов* (М.: Радио и связь, 1987).
- Snyder A.W. *J. Opt. Soc. Am.*, **62**, 1267 (1972).
- Hayashi T., Taru T., Shimakawa O., Sasaki T., Sasaoka E. *Opt. Express*, **19**, 16576 (2011).
- Маркузе Д. *Оптические волноводы и резонаторы* (М: Мир, 1974).
- Адамс М. *Введение в теорию оптических волноводов* (М.: Мир, 1984).
- Marcuse D. *Appl. Optics*, **21**, 4208 (1982).
- Fini J.M., Zhu B., Taunay T.F., Yan M.F. *Opt. Express*, **18**, 15122 (2010).
- Takenaga K., Tanigawa S., Guan N., Matsuo S., Saitoh K., Koshiba M. *OFC 2010 Conf. Papers* (San Diego, Cal., 2010, OWK7).
- Li S., Butler D.L., Li M.-J., Koklyushkin A., Nazarov V., Khrapko R., Geng Y., McCollum R.L. *IPC 2013* (Bellevue, WA, 2013, TuF3.2).